

モビリティマネジメントと都市構造変化についてのマルチエージェントシミュレーション

谷口忠大（立命館大学）高橋佑輔（北陸先端科学技術大学院大学）

Multi-agent simulation about mobility management and urban structural change

*T. Taniguchi (Ritsumeikan University) and Y. Takahashi (JAIST)

Abstract— In this paper, we proposed a simple urban model including individuals' travel behavior and residential choice behavior. Multi-agent simulation framework is described. We performed several experiments to evaluate political measures which will solve problems about motorization. As a result, drastic mobility management scheme increased the number of travelers using a train, and the distribution of residences became compact. However, it also increased many agents' total costs of living because of high rent and several kinds of cost including time cost and fatigue cost to reach a station. On the other hand, raising gas price made CO2 emission less and kept total cost of living lower than the drastic mobility management measure. This suggests that to have people use train or bus by changing their attitude might be socially more expensive than to make people choose whether they use car or not under the condition that gas price is raised.

Key Words: Multi-agent simulation, mobility management, travel behavior

1 Introduction

モータリゼーションが私達の都市環境を流動化させ不安定化させていると指摘されている⁸⁾。都市の形態的、質的な変化が私たちの都市生活に様々な問題を生じさせている。たとえば、地方都市における市街地の賑わいは郊外に開発された大型ショッピングモールに顧客を奪われることで衰退し、空洞化した都心、及び自動車の往来が激しくなった郊外では、交通渋滞、少年犯罪の増加、地域コミュニティの喪失といった様々な負の影響を与えていると言われる⁶⁾。これらに加え、枯渇する化石資源へのエネルギー依存という根本的な現代社会の問題を克服するために、コンパクトシティへの道が模索されている⁴⁾。コンパクトシティでは都市の機能がその中心に集約され、人々が電車やバスといった公共交通、および自転車や徒歩といった交通手段を主に用いて移動することで、賑わいのあるまちづくりが目指される。しかしながら、民主的な近代国家においては、既存の都市を行政の力により強制的にコンパクトにする事などは不可能である。つまり、我々は直接的に都市をコンパクトな状態へと制御することは出来ず、諸々の施策を通じて民間の行動選択、投資行動にバイアスをかけてコンパクトシティへと間接制御をかけるより他ない。コンパクトシティを実現するには土地利用や交通行動の変容に関わる施策を一体的に実現することが重要であると言われる。しかしながら、どのような施策がどのような動的な変化を都市に与えるかについては不明確である。

近年、藤井らは交通行動が居住地選択に及ぼす影響についての調査研究を行い、居住地選択行動がそれ以前の交通行動選択の影響を受ける事を指摘した。これにより、コミュニケーション施策を中心としたソフト施策であるモビリティマネジメントによりコンパクトシティへ都市を導くことが出来る可能性を指摘した⁷⁾。モビリティマネジメントとは当該の地域や都市を「過度に自動車に頼る状態」から、「公共交通や徒歩などを

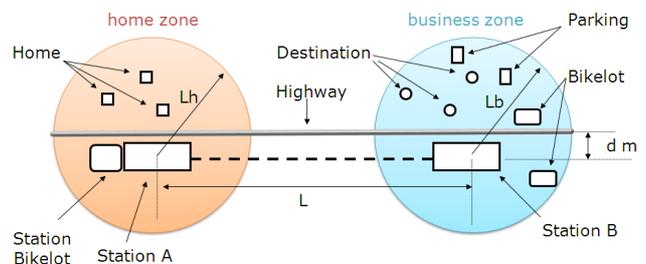


Fig. 1: Simple urban model

含めた多様な交通手段を適度に（＝かきこく）利用する状態」へと少しずつ変えていく一連の取り組みを意味するものである⁵⁾。

本稿では、この藤井らの仮説を前提とし、自動車利用を抑制するどのような施策が個人の交通行動変化と居住地選択行動変化を介して、都市構造の変化を生み出していくのかをマルチエージェントシミュレーションを用いて構造的に検証する。

2 シミュレーションモデル

2.1 都市モデル

本稿では交通行動変化と居住地選択行動変化を同時に議論するために、単純な都市モデルを用いる。Fig. 1に都市モデルの概観を示す。交通行動選択において、各エージェントは総移動コスト (total travel cost) に基づいて交通行動を決定する。総移動コストは時間コスト、料金コスト、疲労コストの三つのコストの重み付き和として計算される。エージェントは交通行動が学習を通して一通りに収束した後に、次の居住地を現在の交通モードを前提として選択するという流れで、都市構造の変化を追う。

シミュレーション空間上には二つの領域があり、一つが居住空間 (home zone) で、もう一つが商業空間 (business zone) である。前者にはエージェントの日々の交通行動の起点となる居住地 (home) があり、後者に

は交通行動の終点となる目的地 (destination) がある。目的地は、店舗やオフィス、学校など多くの種類の施設を含むものとする。各エージェントは日々、このいずれかの目的地へと通勤や購買の目的で移動するものとする。ただし、これら居住空間と商業空間は便宜的に名付けるものであり、厳密な境界はなく、実際にはそれぞれ居住地と目的地の分布により表現される。

居住空間と商業空間はそれぞれ一つずつの駅を持つ。駅 A と駅 B がそれぞれ居住空間と商業空間の中心に置かれる。二次元の座標系がこの都市モデルには定義され、 i 番目の居住地は (x_i^h, y_i^h) の座標を持ち、 j 番目の目的地は (x_j^d, y_j^d) の座標を持つものとする。原点は二つの駅の中点にとる。二駅間の距離は L とし 駅 A と 駅 B がそれぞれ $(-L/2, 0), (L/2, 0)$ に置かれる。

居住地の初期値は駅 A を中心としたガウス分布に基づいてランダムに配置される。また、目的地は駅 B を中心としたガウス分布に基づいてランダムに配置される。それぞれの分布はそれぞれ L_h と L_b の標準偏差をもつ。

全ての地点は連続的に接続され、エージェントは歩行、自転車での移動及び車での移動によりこの連続な空間を移動できるものとする¹。また、幹線道路が二駅間を結ぶ線路の $d_{[m]}$ 北を走る。エージェントは幹線道路では他の空間よりも高速に移動することが出来る。また、エージェントは他の移動手段により幹線道路を移動することは出来ない。また、幹線道路は特定の入り口を持たず、エージェントは y 座標が幹線道路のそれに到達した時点で幹線道路に乗り入れる事が可能になる。

また、駅 A と商業空間内には駐輪場が置かれ、商業空間内には駐車場も置かれる。商業空間内の各駐輪場、駐車場は駅 B を中心としたガウス分布に従って配置される。また、駐車場は民間企業により運営されていると考え、利用率が非常に小さい場合についてはこの駐車場は除去される。

2.2 交通行動

各エージェントは毎日、居住地から目的地へ向かう。各エージェントの日々の交通行動は、それぞれのトリップの交通行動の価値に従った ϵ -greedy 法により確率的に決定される。日々の交通行動の総移動コストは時間コスト、料金コスト、疲労コストの三つの重み付き和により計算される。この重みを本稿では選好バイアスと呼ぶ。

2.2.1 トリップ

交通行動分析の分野では人の移動はトリップという単位で認識される。出発点から目的地への一連の交通行動は交通行動分析の分野では目的トリップ (もしくは、linked trip) と呼ばれる。その人が複数の交通モードを用いて目的地にたどり着いた場合でも、それら一連の交通行動をリンクトリップと呼ぶ。一方で、リンクトリップの要素となる、一単位のトリップを手段トリップ (もしくは、unlinked trip) と呼ばれる。Fig. 2 に示すように、たとえば、家から会社までの移動は目的トリップであり、家から駅 A、駅 A から駅 B、駅 B から会社への移動は手段トリップである。

¹ただし車の移動については渋滞の効果が考慮される。

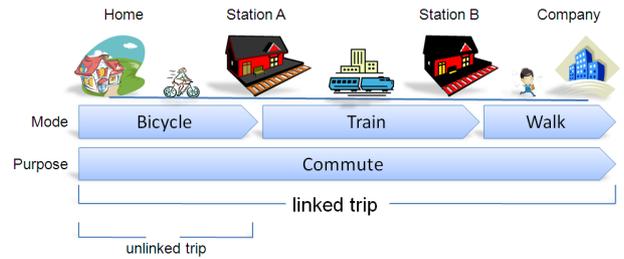


Fig. 2: linked trip and unlinked trip

我々の都市モデルでは、Fig. 3 に示すように、8種類の目的トリップを想定する。これら8個の選択肢は次節で定義される各目的トリップの価値に基づき ϵ -greedy 法によって確率的に選択される。手段トリップとして徒歩、自転車、自動車、及び電車が定義される。Fig. 3 内の手段トリップで自転車で駅 A に向かっているにもかかわらず、駐輪場を経由していないものは、駅前に違法駐輪している事を示す。違法駐輪を行う自転車は確率 P_r で撤去され、エージェントは罰金としてのコスト c_R を支払うことになる。

手段トリップの中で、最も代表的な交通手段は代表交通手段と呼ばれる。基本的に代表交通手段となる優先度は電車、自動車、自転車、そして徒歩の順である。

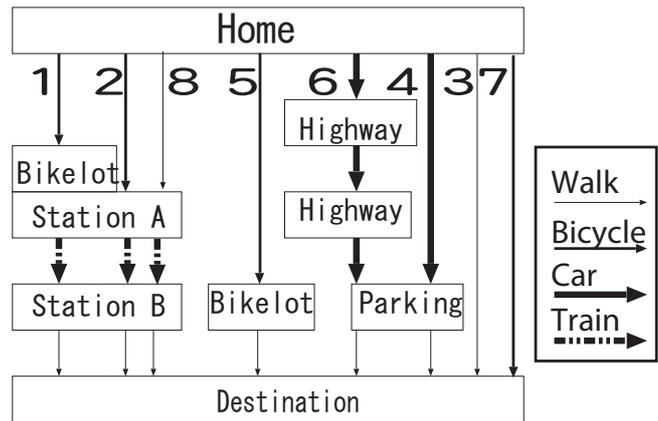


Fig. 3: Variety of trips

2.2.2 コスト

それぞれのエージェントは i 番目の手段トリップの総移動コスト C_i に基づいて各目的トリップの価値 V_i を学習する。

- 総移動コスト C_i

$$C_i = \omega_T C^T + \omega_M C^M + \omega_F C^F \quad (1)$$

$$\omega_T + \omega_F + \omega_M \leq 1 \quad (2)$$

$$\omega_T, \omega_F, \omega_M \geq 0 \quad (3)$$

$C^T, C^M,$ と C^F はそれぞれ 時間コスト, 料金コスト, 疲労コストを表す。同様に, $\omega_T, \omega_F,$ と ω_M はそれぞれ時間コスト, 料金コスト, 疲労コストの選好バイアスを表す。それぞれの値はエージェントにより異なる。本稿の実験では、これらを一定とした。

- 時間コスト C^T

$$C^T = \eta^T T \quad (4)$$

ここで T はエージェントが出発地から目的地に到達する時間であり、 η^T は時間をコストに変換する係数である。

- 料金コスト C^M

$$C^M = c_b + c_c + c_t + c_G T_c + c_R. \quad (5)$$

料金コストは駐車場料金 c_c と、駐輪場料金 c_b 、電車賃 c_t 、ガソリン代 $c_G T_c$ 、及び駐輪撤去のペナルティ c_R の和として表現される。ガソリン代金は運転時間 T_c に比例する。もし、エージェントが違法駐輪を行った場合には、確率 P_r で撤去される。

- 疲労コスト C^F

$$C^F = (F_w T_w + F_b T_b + F_c T_c + F_t T_t) + F_{con} \quad (6)$$

T_w, T_b, T_c, T_t はそれぞれ歩行、自転車、自動車、電車による移動時間を表す。 F_w, F_b, F_c, F_t は時間からコストへ変換する係数である。これに渋滞による疲労コストを表す F_{con} を足すことで疲労コストが計算される。

総移動コスト C_i は毎日エージェントが目的地に着く度に計算される²。総移動コストを受け取った後に、エージェントは i 番目の目的トリップの価値を下のように変化させる。

$$V_i \leftarrow \alpha(-C_i) + (1 - \alpha)V_i \quad (7)$$

日々の交通行動はこの価値に基づいた ϵ -greedy 法により毎日決定される。 ϵ -greedy 法では、最も価値のあるルートが $1 - \epsilon$ の確率で選ばれ、別のルートがランダムに確率 ϵ で選ばれる。 ϵ は下式に従って ($\gamma < 1$) 徐々に減衰させる。

$$\epsilon \leftarrow \gamma \epsilon \quad (8)$$

ϵ は試行を重ねる度に徐々に 0 に向かう。

2.2.3 渋滞の影響

エージェントが渋滞の中を移動した際には、追加での時間コストと疲労コストを考慮する。本稿のモデルではエージェント周辺のエージェントの密度が D_0 [agents/km] より大きくなった際に渋滞が発生すると考える。

渋滞下における車の移動速度 V_c は以下のようにして決定する。

$$V_c = \max(V_c^{min}, \min(\eta_v \times (D - D_0) + \alpha_v, V_*)) \quad (9)$$

D はエージェント周り 100[m] 四方でのエージェントの密度を表し、 η_v は変換係数を表す。 α_v は定数項を表す。 V_* は車の通常速度を表し、これは道の種類に依存する。つまり、幹線道路では $V_* = V_h$ となり、通常の道路では $V_* = V_c$ となる。これらの式は参考文献²⁾を参考に作成した。

²駐輪撤去や渋滞といった不確かな事象により、同じルートであっても総コストは毎回変化する。

渋滞による疲労コストは下記のように算出される。

$$F_{con} = \min(F_{con}^{max}, \eta_{con} D) \quad (10)$$

ここで F_{con} は渋滞による疲労コストを表し、 η_{con} は密度から疲れへの変換係数をあらわす。また、 F_{con} は F_{con}^{max} を超えないものとする。

2.2.4 移動

本稿の実験では、全てのエージェントは居住地を同時に出発する。エージェントは現在の位置から、現在選択している手段トリップのゴールに向かって直進するものとする。また、自転車や自動車で移動するエージェントは合法的に最終目的地に最も近い、駐輪場もしくは駐車場に停めなければならない。

2.3 居住地選択行動

本節では、居住地選択行動のアルゴリズムについて記述する。十分な日数が経過し交通行動が収束した後に、エージェントの一部は自らの居住地を変更する。

まず、居住地を変更することになったエージェントには、いくつかの候補がランダムに提示される。この候補は現在の居住地の分布をガウス分布でモデル化した後に、このガウス分布から生成されるものとする。エージェントはいくつかの候補が提案された後に、この候補の中から、最も自らの総生活コスト C_i^l が最小となる居住地を選ぶ事で転居先を決定する。総生活コスト C_i^l は地代 r_i と総移動コスト C_i の和で表されるものとする。

ここで藤井らの研究⁷⁾に基づき、居住地選択を行うときの総生活コスト計算には転居前の交通行動選択を用いる事にする。

$$C_i^l = r_i + C_i \quad (11)$$

それぞれの地域での地代 r_i は下記に従うものとする。

$$r_j = \eta_r I_j \left(\frac{H_j}{A_j} \right) \quad (12)$$

居住空間、商業空間には一定区画ごとに地代を設定する。本研究においては 1 区画を 100[m] × 100[m] とする。地代は戸川の研究で用いられた土地消費量と地代の関係を示すデータを参考にしている³⁾。 A_j は一区画の広さを表し、 H_j はその区画で住人や会社が消費する面積を示す。これは、人口の集中が地代を上昇させることを意味する。

転居前に候補地の総生活コスト C_i^l を計算するために各エージェントは仮想的に目的地への移動を行う。この際に、他のエージェントも同時に移動を行うことで渋滞などの影響も加味した上で、それぞれのエージェントは総生活コストを見積もる事が出来る。このようにして、エージェントの居住地選択行動はエージェントの習慣的な交通選択行動に影響を受けることとなる。

3 実験

3.1 実験条件

実験で用いたパラメータを Table 1 に示す³⁾。実験では、交通行動選択では 30 日間の学習を行い、その後に

³全てのパラメータは様々な資料からの断片的な情報に基づき、比較的自然而と考えられる値を設定した。しかし、十分に正確性であるとは言え切れず、この値の変化により当然結果は変化するが、本稿ではこれらの微小な違いに依存しない範囲で議論を進めるよう配慮し議論を進める。

居住地選択を行うというループを 10 回行った。この際、一度に転居するエージェントは全体の 1/10 とした。

Parameter	initial value (unit)
エージェント数	1000
居住地数	1000
目的地数	1000
ϵ	0.7
α	0.5
γ	0.94
歩行速度 V_w	66(m/min.)
自転車速度 V_b	267(m/min.)
自動車速度 V_c	450(m/min.)
電車速度 V_t	$L/7+350$ (m/min.)
自動車速度(幹線道路) V_{ch}	600(m/min.)
歩行疲労コスト T_w	220
自転車疲労コスト T_b	80
自動車疲労コスト T_c	20
電車疲労コスト T_t	40
ガソリン価格 c_G	0.01(yen/m)

Parameter	initial value (unit)
電車運賃 c_t	$L \times 0.04$ (yen/m)
η^T	30(yen/min.)
駐輪場数	1000
駐車場数	1000
駐輪場代金 c_b	150(yen)
駐車場代金 c_c	800(yen)
二駅間距離 L	4000(m)
幹線道路・線路間距離 d	10(m)
居住地区サイズ L_h	3200(m)
商業地区サイズ L_b	3200(m)
自転車撤去率 P_r	0.5
違法駐輪罰金 c_R	3000(yen)
駐車場許容量	4
居住地サイズ	140(m^2)
地代係数 η^r	1000
区画の大きさ	100(m^2)

Table 1: Parameters

本実験ではモビリティマネジメントにおけるコミュニケーション施策を極端にした形である (MM $X\%$) 条件と、ガソリン価格を上昇させる (gas price $\times Y$) の二つの施策によって、自動車からその他の交通へのモードシフトと、その波及としての居住地選択行動への影響による居住地の分布変化を検証する。

モビリティマネジメント施策の一つとして TFP(Travel Feedback Program) と呼ばれる施策がある。これは、居住者一人一人にコミュニケーションを通して、自動車から公共交通への乗り換えを様々な情報提供を通して実現していくアプローチである⁵⁾。これは、コストへのアプローチではなく、社会的な態度へのアプローチであると言われる⁹⁾。目に見えるコストの変化ではなく、意思決定に於ける態度にアプローチして交通行動を変化させようと言うものである。

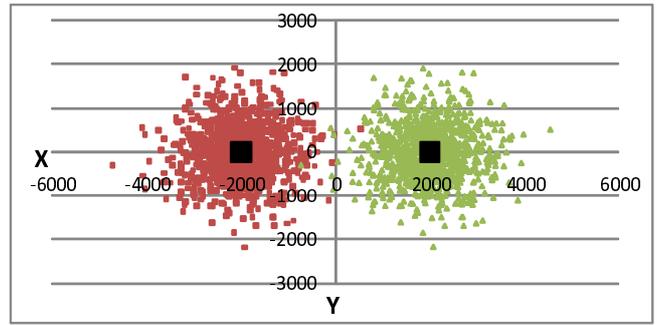


Fig. 4: Initial positions of homes and destinations

このシミュレーション上の表現として、(MM $X\%$) 条件では、 $X\%$ の自動車利用者が電車利用に乗り換えるように変化させられるとする。もう一つの条件である (gas price $\times Y$) 条件ではガソリン価格が Y 倍になるとする。この価格上昇は原油の枯渇による石油価格の高騰が原因であるとしても、政策的に炭素税などの措置により高騰したととらえても構わない。これら前提の下で、(MM 0%, 20%, 50%, 100%), および (gas price $\times 2, \times 5, \times 10, \times 100$) の条件の下で実験を行った。

3.2 実験結果

Fig. 4 は居住地区、商業地区のそれぞれの初期分布をしめしている。黒い正方形が二つの駅を表している。また、それぞれの実験条件下で 3 回の実験を行い、その平均の結果を下に示す。

Fig. 5 は何の政策もとられなかった際の最終的な居住地の分布とそれぞれの交通モードの利用率を示す。居住地の分布は商業地区の周辺にひろがり、多くの人は車を用いて、目的に向かい、少しの人だけが他の交通手段を用いた。

Fig. 6 は全ての自動車利用者が電車を使うように転換された際の、最終的な居住地の分布と交通モードの利用率を表している。交通行動の変化に伴い、それが有利に働くような居住地へ向かうために、居住地の分布がコンパクトになっている。

Fig. 7 はガソリン価格が 100 倍に跳ね上がった場合の結果を表している。この条件下でも、やはり都市の構造はコンパクトになっているが (MM 100%) 条件と比較すると、質的な差がある。この条件下では、コンパクトにはなっているが、居住地区の分布は (MM 100%) 条件に比べると、多少広く分布している。また、居住地区と商業地区の間にクラスターが生まれており、分析した結果、ここに住む人は自転車を用いて、目的地へと直接向かっている事がわかった。

これらの図に於いて (il.) は違法駐輪 (illegal parking) を、CAR(H) は幹線道路上を走行している事を意味している。また Train (Walk) は、駅 A まで、歩いて向かっている事を意味している。

CO₂ の排出量、交通に求められる都市空間、各エージェントの総生活コストの総和を簡便な手法で計算した。UPI report がそれぞれの交通モードにおける環境負荷の相対的な値を報告しており、単純にこれらの値を、交通モード利用の割合に掛け合わせ比較することにより、相対的な環境負荷の変化を調べた¹⁾。

Fig. 8 は CO₂ 排出量を、Fig. 9 は必要空間を、また、Fig. 10 は全てのエージェントの総生活コストの総和を

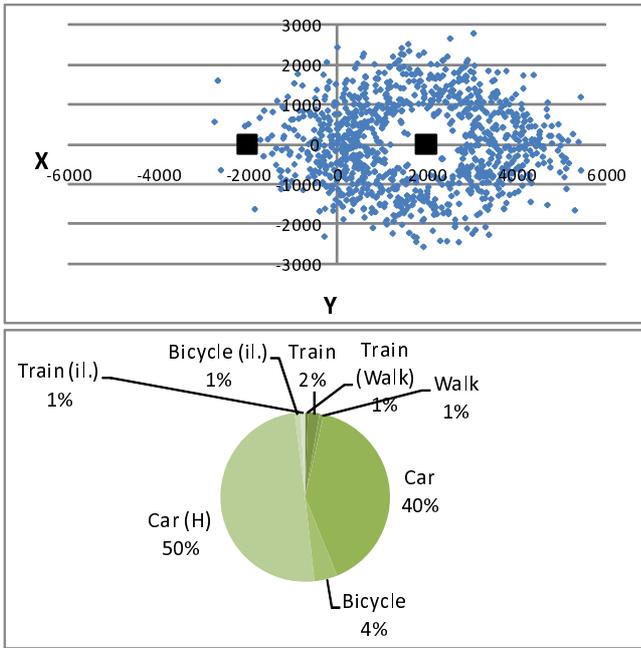


Fig. 5: Without political measures (top) Final distribution of residences (bottom) utilization ratio of each mode

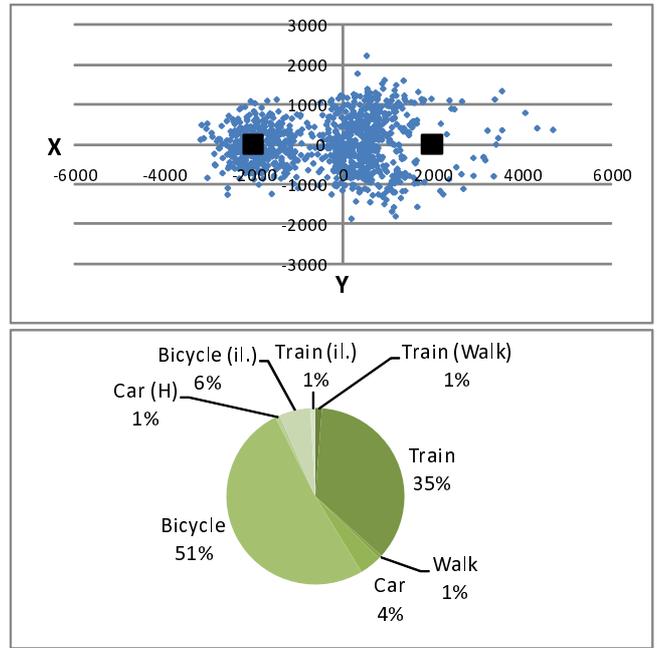


Fig. 7: With 100 times gas price (top) Final distribution of residences (bottom) utilization ratio of each mode

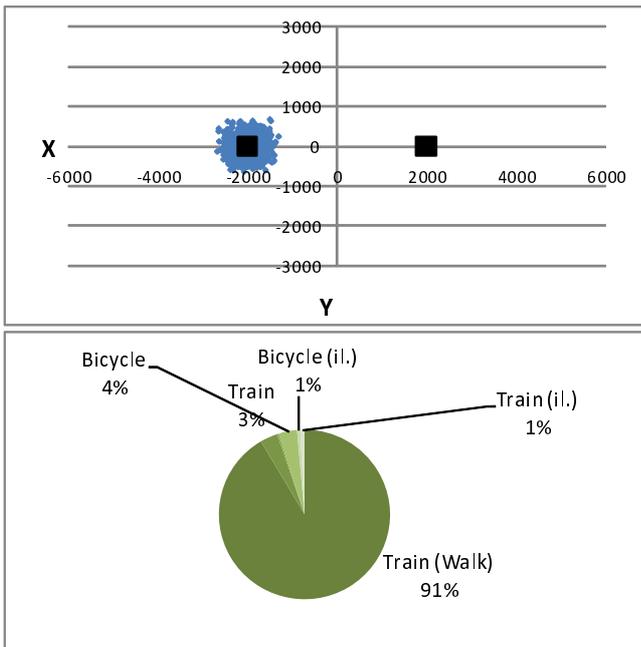


Fig. 6: With 100% mobility management (top) Final distribution of residences (bottom) utilization ratio of each mode

Table 2: Comparison of environmental impact of transport modes (Base = 100 for private car)

	Car	Train	Walk	Bicycle
CO ₂	100	30	0	0
Space consumption	100	6	4	2

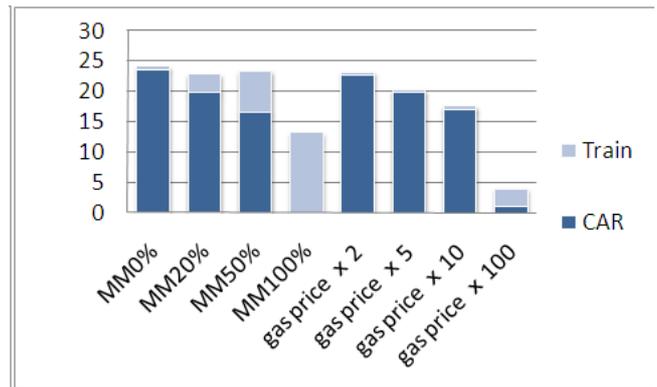


Fig. 8: CO2 emission for each condition

表している．これらの縦軸はUPI reportの各交通モードの負荷の比率に基づくものであり，相対的な指標のみに意味があり，絶対的な値は意味を持たない．

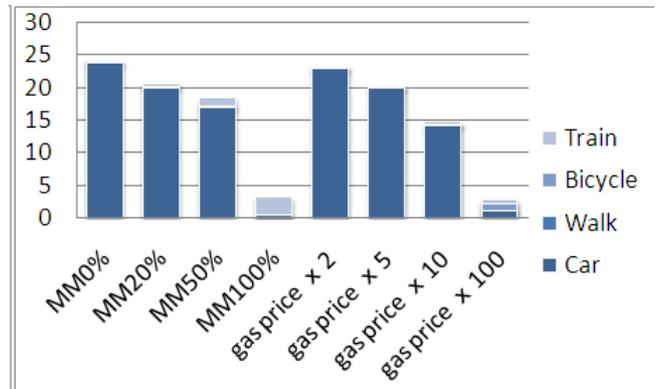


Fig. 9: Required urban space for transportation for each condition

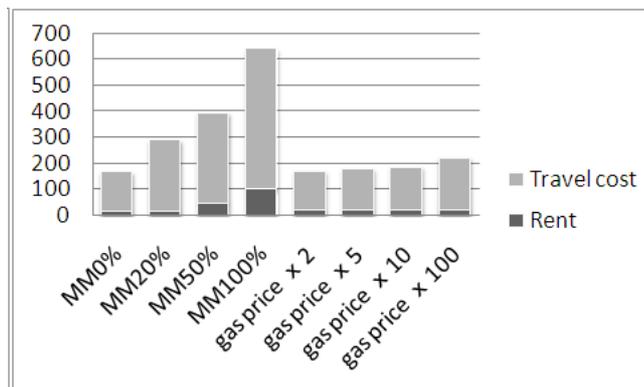


Fig. 10: Total cost of all agents for each condition

3.3 議論と考察

強制的な公共交通への乗り換えはCO₂の排出を十分に減らすことは無かった。MM 100%の条件では、最終的にはCO₂の排出量は半分程度に収まった。しかし、電車へのモードシフトは全体としての総生活コストを急激に上昇させた。これはまた、駅A周辺の地価上昇や駅まで歩くことについての疲労コストや時間コストの上昇に起因するものと考えられる。確かに、居住地の分布はコンパクトになっている。しかし、このような政策は、住民の負担を増大させるのみならず、都市空間の効率的利用や、CO₂排出削減の視点からみても、それほど大きな効果は持たないことがわかる⁴。

これに対し、ガソリン価格を上昇させるとCO₂の排出と必要空間はなだらかに減少した。MM 100%条件に比べると居住空間の分布は広がっているにも関わらず、CO₂排出や必要空間は減少した。このことは、直感的なコンパクトさが、必ずしも本質的なコンパクトさに結びつかない事を示唆している。さらに、ガソリン価格の上昇にも関わらず、総生活コストはそれほど増加しなかった。これは、エージェントが交通行動と居住地を柔軟に変化させることで自らの出費を減らした結果である。gas price × 100 (Fig. 7)条件での特徴的な結果は、自転車と電車がそれぞれにトリップを分担していた点にある。電車は確かに優れた交通機関であるが、一方で、やはり電力消費によるCO₂排出もある。また、徒歩と電車の組み合わせでは駅の周辺に過度な集中が生まれる。一方で、自転車は本質的にCO₂を排出せず、都市空間の消費も小さい。自転車を上手く利用した施策の実現が重要になるであろう。

4 結言

本稿では、個人の交通行動選択と居住地選択を含んだシンプルな都市モデルを提案した。この都市モデル上で自動車利用を減らすための複数の施策を検証し、その質的違いを観察した。結果として、人間の社会的態度に訴え、強制的に電車利用に乗り換えさせるような施策は、電車利用者を増やし、居住地の分布を駅周辺にコンパクトにはするが、一方で、地代の上昇や、駅までの交通コストの増大によってエージェントの総生活コストを増加させることがわかった。一方で、ガソリン価格を上昇させることは、エージェントの総生活

コストをそれほど増大させずに、CO₂排出を減少させることがわかった。これは、社会的態度に訴求して人々の交通行動を恣意的な方向に変化させることでコンパクトシティを目指す手法は、ガソリン価格を上昇させた上で、何の交通モードを用いるかは自らに選択させる手法に比べて社会的により高価になる事を示唆している。しかし、モビリティマネジメントにおけるTFPを自動車から電車への強制的な乗り換えと解釈することは、多少乱暴であり、より適切なモデル化の方向性が求められる。このようなフレームワークの上で、都市システムに隠れた因果関係を抽出する事が、今後の課題である。

Acknowledgment

本研究を行うに当たり、「不便の効用を活用したシステム論の展開」(平成21年度-25年度、科学研究費補助金基盤研究(B))及び「記号過程を内包した動的適応システムの設計論」(平成19-23年度、科研費学術創成、19GS0208の一部支援を受けた)。

参考文献

- 1) *Implementing Sustainable Urban Travel Policies: Moving Ahead: National Policies To Promote Cycling*. Organization for Economic, 2004.
- 2) 西成活裕. 渋滞学 (新潮選書). 新潮社, 9 2006.
- 3) 戸川卓哉, 林良嗣, 加藤博和. マルチエージェントアプローチによる均衡型土地利用モデルの拡張. 第37回土木計画学研究発表会投稿原稿, 2008.
- 4) 海道清信. コンパクトシティ - 持続可能な社会の都市像を求めて. 学芸出版社, 8 2001.
- 5) 藤井聡, 谷口綾子. モビリティ・マネジメント入門 - 「人と社会」を中心に据えた新しい交通戦略. 学芸出版社, 3 2008.
- 6) 三浦展. ファスト風土化する日本 - 郊外化とその病理 (新書y). 洋泉社, 9 2004.
- 7) 藤井聡. 交通行動が居住地選択に及ぼす影響についての仮説検証: コンパクト・シティへの誘導に向けた交通政策に関する基礎的研究. Vol. 43, No. 6, pp. 53-62, 2008.
- 8) 北村隆一. ポスト・モータリゼーション - 21世紀の都市と交通戦略. 学芸出版社, 12 2001.
- 9) 北村隆一, 佐々木邦明, 山本俊行, 森川高行, 藤井聡. 交通行動の分析とモデリング - 理論/モデル/調査/応用. 技報堂出版, 5 2002.

⁴ただし、これらの結果はUPI reportの係数を単純にかけるといった評価手法による影響もある。